

The effect of using bi-levels of geocomposite sheets on the quality of Shahrekord University wastewater

Sajad Googoochani¹ , Mahdi Ghabadina^{2*} , Sayyed Hassan Tabatabaei³ , Hamidreza Motaghian⁴ , Azimeh Asgari⁵ 

¹ Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

⁵ Ph.D., Co-researcher of Water Research Center, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Extended Abstract

Introduction

Due to the scarcity of freshwater resources, treated wastewater is increasingly recognized as a sustainable alternative for irrigation and other purposes. One effective method of wastewater reuse is its application in agricultural fields. Subsurface irrigation systems, which fall under the category of land treatment systems, are commonly employed for this purpose. The land treatment system is a wastewater treatment and reuse technology that enhances wastewater quality by allowing it to pass through the soil, where it undergoes natural treatment processes. Numerous studies have demonstrated that underground irrigation systems can significantly reduce environmental pollution and minimize the risks of soil and plant contamination associated with wastewater usage. Furthermore, the wastewater collected from irrigation can be harvested for reuse by improving its microbial and biochemical quality. Additionally, land treatment technology is environmentally friendly as it reduces the adverse effects of wastewater discharge on the environment. It achieves this by reducing and eliminating the amount of pollutants present in wastewater, minimizing energy and chemical consumption, and ultimately reducing the overall cost of wastewater treatment and reuse compared to other methods. In this study conducted at the University of Shahrekord, the researchers examine the effect of utilizing geocomposite plates at two different levels for sewage utilization. They also investigate the resulting changes in the chemical properties of sewage within the context of land treatment.

Materials and Methods

This study investigated the effectiveness of bi-levels of geocomposite sheets in wastewater irrigation, drainage water collection, and land treatment at Shahrekord University. Geocomposite sheets were used for the water influx layer and drainage layer. The treatments included two distances of 35 and 75 cm between the water influx and the drainage layer. In both treatments, the water influx layer was 40 cm below the ground surface. The wastewater used in this research was obtained from a sewage manhole at Shahrekord University. Before use, the wastewater was subjected to preliminary treatment by passing through a mesh strainer, a sand filter, and a geotextile filter. The research was conducted as a factorial experiment based on a completely randomized design with three replications. The factors studied included the injection stage of wastewater (time) at twelve levels and the distance of drainage from the influx layer in two levels. Wastewater was injected 12 times with a weekly frequency. The measured parameters in all injections included: EC, pH, sum of calcium and magnesium, carbonates and bicarbonates, volume of input wastewater, and volume of drainage water. Sodium, BOD₅, and nitrates of wastewater and drainage water were measured only in the 2nd, 4th, 6th, and 8th of wastewater injection. The urban wastewater of Shahrekord University has an average salinity of 0.67 dS m⁻¹, sodium of 1.4 meq l⁻¹, nitrates of 15.7 mg lit⁻¹, and bicarbonate of 4.41 meq l⁻¹, which has an average limit for use in agriculture.

Results and Discussion

The results showed that passing wastewater into the soil was caused increasing in EC, sum of calcium and magnesium and bicarbonates of the wastewater while decreasing in SAR, BOD₅ and nitrates. According to the results, the treatment with a thickness of 70 cm caused a significant increase in salinity, bicarbonate and total calcium and magnesium in the drain water by 31.34, 31.97 and 161.9%, respectively, compared to the wastewater and 11.39, 20.29 and 10.0% compared to the treatment with a thickness of 35 cm. The amount of nitrate in the drain water was significantly reduced in the treatment with a thickness of 70 cm by 19.80% compared to the wastewater and 6.04% compared to the other treatment. In the period of the study, as the number of injection stages

increased, the percentage of nitrate changes in wastewater due to passing through the soil decreased. In other words, the ability of the soil to remove nitrate from wastewater gradually decreased. In addition, land treatment in treatments with a thickness of 70 and 35 cm, respectively, caused a decrease of 19.28 and 15.71% of sodium, 16.36 and 13.87% of BOD5, and 54.29 and 50.75% of SAR and an increase of 10.10 and 8.7% pH of drain water compared to wastewater. However, the percentage of changes of these indices between the two treatments with a distance of 70 and 35 cm between the water influx and the drainage layer did not show a significant difference.

Conclusion

The study aimed to assess the soil's ability to enhance wastewater quality when combined with geocomposite plates. Overall, the passage of wastewater through the soil layer increased pH, salinity, total calcium, magnesium, and bicarbonate levels, while reducing sodium, nitrate, BOD5, and SAR in the wastewater. Notably, the 70 cm thick treatment significantly increased salinity, bicarbonate, and total calcium and magnesium levels in the sewage compared to other treatments. Additionally, the nitrate content in the sewage decreased more significantly in the 70 cm thick treatment. However, the percentage of changes in these indicators did not significantly differ between the treatments with a distance of 70 cm and 35 cm between the water and drainage layer. Based on the experiment's results, applying a drainage layer at a distance of 35 cm from the water and drainage layer created better conditions for wastewater reuse, especially when the drainage volume is not high. In such cases, the passage of wastewater through the soil layer at a distance of 35 cm appeared to contribute to improved wastewater conditions. However, it is important to note that the use of wastewater may also initiate soil degradation, requiring further investigation for potential solutions in future research.

Keywords: Drainage, Drainage water quality, Geocomposite, Land-based treatment, Urban wastewater

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the University of Shahrekord for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Sajad Googochani: Resources, software; **Mahdi Ghobadina:** Formal analysis and investigation, supervision; **Sayyed Hassan Tabatabaei:** Conceptualization, methodology; **Hamidreza Motaghian:** Visualization, adviser; **Azimeh Asgari:** Editing, final analysis.

*Corresponding Author, E-mail: mahdi.ghobadi@sku.ac.ir

Citation: Googochani, S., Ghobadina, M., Tabatabaei, S.H., Motaghian, H., & Asgari, A. (2024). The effect of using bi-levels of geocomposite sheets on the quality of Shahrekord University wastewater. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(4), 203-218.

DOI: 10.22098/mmws.2023.13732.1362

Received: 28 September 2023, Received in revised form: 06 November 2023, Accepted: 10 November 2023., Published online: 17 December 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 203-218

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





اثر کاربرد دو ترازوی صفحات ژئوکمپوزیت بر کیفیت پساب دانشگاه شهرکرد

سجاد گوگوچانی^۱، مهدی قبادی‌نیا^۲، سید حسن طباطبائی^۳، حمیدرضا متقیان^۴، عظیمه عسگری^۵

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۴ دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۵ دکتری آبیاری و زهکشی، پژوهش‌گر همکار مرکز تحقیقات آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

امروزه استفاده از پساب تصفیه شده، به‌عنوان جایگزین آب شیرین مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر کاربرد دو ترازوی صفحات ژئوکمپوزیت و اثر آن بر تغییرات متغیرهای شیمیایی پساب دانشگاه شهرکرد در تصفیه زمینی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از صفحات ژئوکمپوزیت به‌عنوان لایه‌های آبد و زهکش استفاده شد. تیمارهای پژوهش شامل دو فاصله ۷۰ و ۳۵ سانتی‌متر بین لایه آبد و زهکش بود. در هر دو تیمار، لایه آبد در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از سطح خاک قرار گرفت. تزریق پساب به داخل خاک طی ۱۲ نوبت و با تناوب هفتگی انجام شد. در تمامی مراحل تزریق، مقادیر pH، شوری، مجموع کلسیم و منیزیم، بی‌کربنات و حجم آب ورودی و خروجی و در نوبت دو، چهار، شش و هشت، مقادیر سدیم، نیترات و BOD₅ پساب و زه‌آب اندازه‌گیری شد. پساب شهری دانشگاه شهرکرد با توجه به مشخصات شیمیایی آن بر طبق استاندارد سازمان جهانی خوار و بار و کشاورزی (فائو) از نظر مقادیر نیترات و بی‌کربنات دارای محدودیت متوسط برای استفاده در کشاورزی است. نتایج این آزمایش نشان داد که به‌طور کلی عبور پساب از خاک باعث افزایش pH، شوری، مجموع کلسیم و منیزیم، بی‌کربنات و کاهش نیترات، BOD₅ و SAR شد. با توجه به نتایج، تیمار با ضخامت ۷۰ سانتی‌متر باعث افزایش معنادار شوری، بی‌کربنات و مجموع کلسیم و منیزیم زه‌آب به‌ترتیب به‌طور میانگین ۳۱/۳۴، ۳۱/۹۷ و ۱۶۱/۹ درصد نسبت به پساب و ۱۱/۳۹، ۲۰/۲۹ و ۱۰/۰ درصد نسبت به تیمار با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر شد. میزان نیترات زه‌آب نیز در تیمار با ضخامت ۷۰ سانتی‌متر به‌صورت معنادار به‌طور میانگین ۱۹/۸۰ درصد نسبت به پساب و ۶/۰۴ درصد نسبت به تیمار دیگر کاهش یافت. نتایج نشان داد که درصد تغییرات این پارامترها در بین دو تیمار با فاصله ۷۰ و ۳۵ سانتی‌متر بین لایه آبد و لایه زهکش تفاوت معنادار نداشت. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که این سامانه کارایی مناسبی برای استفاده پساب در زمین‌های کشاورزی دارد و در شرایط آزمایش تیمار ۳۵ سانتی‌متر نتایج بهتری را با توجه به فرضیه پژوهش حاصل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پساب شهری، تصفیه زمینی، زهکشی، ژئوکمپوزیت، کیفیت زه‌آب

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mahdi.ghobadi@sku.ac.ir

استناد: گوگوچانی، سجاد، قبادی‌نیا، مهدی، طباطبائی، سیدحسن، متقیان، حمیدرضا، و عسگری، عظیمه (۱۴۰۳). اثر کاربرد دو ترازوی صفحات

ژئوکمپوزیت بر کیفیت پساب دانشگاه شهرکرد. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۲۰۳-۲۱۸.

DOI: 10.22098/mmws.2023.13732.1362

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۲۰۳ تا ۲۱۸

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی
© نویسندگان



۱- مقدمه

در پژوهشی، (Amin et al., 2021) عبور پساب از لایه خاک با ضخامت ۳۰۰ سانتی‌متر را در حذف بسیاری از آلاینده‌ها از آن، بسیار مؤثر ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که تحت تأثیر عبور پساب از لایه خاک، مقدار COD و BOD به ترتیب ۸۳/۲۷ و ۸۳/۲۴ درصد، کل نمک‌های محلول، ۹۱/۴ درصد، مواد جامد معلق، ۴۷/۹ درصد، کلیرم کل، ۹۹/۴ درصد و کاتیون‌های سدیم، منیزیم و کلسیم به ترتیب ۴۳/۵، ۸۴/۵ و ۱۵ درصد کاهش یافت. همچنین، آن‌ها راندمان این سامانه در حذف فلزات سنگین کادمیوم، روی، سرب، منگنز، مس، آلومینیوم و کروم را به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۵۹/۸، ۵۲/۹، ۱۰/۸، ۸/۹، ۵/۵ و صفر درصد گزارش کردند. در ادامه، (Mienis and Arye, 2018) به بررسی تغییرات بلندمدت (۴۰ سال) نیتروژن کل و اجزای آن (آمونیم، نیترات و نیتروژن آلی) در یک سامانه تصفیه زمینی پرداختند. آن‌ها با اشاره به نقش قابل توجه لایه‌های سطحی خاک در فرآیند تصفیه، مقدار حذف نیتروژن کل در لایه ۶۷ متری سطحی را ۶۳-۴۷ درصد و مقدار کل حذف، شامل ۱۰۶ متر لایه‌های سطحی و زیرین سامانه، را ۸۳-۴۸ درصد گزارش کردند. (Javani et al., 2015) با اشاره به قابلیت ستون‌های خاک در حذف مواد جامد معلق، BOD₅ و COD و کاهش pH پساب بیان کردند که استفاده از پوشش ژئوتکستایل روی سطح خاک، کارایی سامانه‌های تصفیه زمینی را به‌ویژه در حذف مواد جامد معلق، BOD₅ و COD افزایش می‌دهد. در پژوهشی دیگر، (Torabi Far et al., 2013) از خاک منطقه همراه با گیاه وتی‌ور و چیدمان مصنوعی خاک (خاک منطقه، ماسه سیلیس و شن) به‌منظور تصفیه پساب خروجی از حوضچه ته‌نشینی ثانویه استفاده کردند. نتایج نشان داد که سیستم گیاه-زمین می‌تواند پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را با شرایط استاندارد تخلیه پساب به محیط منطبق سازد، بنابراین در صورت وجود زمین کافی و در دسترس، گزینه‌ای مقرون به صرفه با کاربری ساده برای تصفیه تکمیلی فاضلاب‌ها است. در پژوهش صورت گرفته توسط (Hosseinpour et al., 2009)، میانگین مقدار شوری، نسبت جذب سدیم، نیتروژن-نیتراتی، فسفر-فسفاتی، کربن آلی کل و دو فلز سنگین نیکل و کادمیم در زه‌آب‌های خروجی از ستون‌های به طول ۱۵۰ سانتی‌متر حاوی خاک لوم شنی، همواره کم‌تر از میانگین مقدار آن در فاضلاب‌های ورودی به ستون‌های خاک به‌دست آمد؛ اما با استمرار کاربرد فاضلاب در طول زمان، مقدار آن‌ها افزایش یافت.

ژئوسنتتیک‌ها با استفاده از انواع پلیمرها ساخته می‌شوند و استفاده از آن‌ها در طرح‌های آب و خاک به‌عنوان مصالحی جدید مورد استقبال مهندسين و کارشناسان در بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفته است. به‌طور کلی ژئوسنتتیک عنوانی برای توصیف صفحات نازک و انعطاف‌پذیری است که در داخل توده

در بسیاری از مناطق جهان منابع آب به‌دلیل توسعه شهری و صنعتی همراه با رشد سریع جمعیت و خشکسالی‌های پی در پی ناشی از تغییرات اقلیمی در معرض فشار و کمبود شدید قرار گرفته‌اند (Garcia and Pargament, 2015). علاوه‌براین، با افزایش جمعیت و توسعه فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، مصرف آب و در نتیجه تولید فاضلاب‌ها و تخلیه آن‌ها به محیط زیست افزایش یافته است. این امر به‌دلیل وجود عناصر سنگین و مواد سمی و مضر در فاضلاب‌ها موجب بروز مشکلات محیط زیستی جدی شده است (Sdiri et al., 2023). از این‌رو، توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نو و پایدار از نظر محیط زیستی برای تصفیه و استفاده مجدد از آب و فاضلاب به‌منظور کاهش مشکلات جهانی کمبود آب، رشد فزاینده جمعیت و شهرنشینی، آلودگی منابع آب و هزینه‌های بالای تصفیه آب و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان داده است که استفاده از سامانه‌های آبیاری زیرسطحی در شرایط استفاده از پساب، منجر به کنترل بیشتر آلودگی‌های محیط زیستی شده و احتمال آلودگی خاک و گیاه را کاهش می‌دهد (Najafi et al., 2005; Forslund et al., 2010; Oron et al., 1992). علاوه‌براین، سامانه‌های آبیاری زیرسطحی یکی از انواع سامانه‌های تصفیه زمینی طبقه‌بندی می‌شوند. سامانه تصفیه زمینی یکی از فناوری‌های تصفیه و استفاده مجدد از فاضلاب است که کیفیت پساب فاضلاب را از طریق عبور از خاک بهبود می‌دهد (Sharma and Kennedy, 2016). سامانه تصفیه زمینی از جمله سامانه‌های تصفیه طبیعی است. این سامانه دارای تکنولوژی ابتدایی و کارکرد آسان است که امکان تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و ذخیره آب را فراهم می‌نماید (Aharoni et al., 2011). این تکنولوژی، تصفیه زمینی سازگار با محیط زیست است و اثرات نامطلوب تخلیه فاضلاب به محیط زیست را از طریق کاهش و حذف میزان آلاینده‌ها در پساب کاهش می‌دهد. همچنین، مصرف انرژی و مواد شیمیایی را به حداقل می‌رساند و در مقایسه با روش‌های دیگر هزینه کلی تصفیه و استفاده مجدد از پساب‌ها را کاهش می‌دهد (Sharma and Kennedy, 2016; Tabatabaei et al., 2023). در سامانه‌های تصفیه زمینی با عبور پساب از خاک، جامدات معلق، فلزات سنگین، مواد آلی، مواد مغذی و عوامل بیماری‌زا از پساب حذف می‌شوند و کیفیت فیزیکی، شیمیایی و میکروبی آب بهبود می‌یابد (Sharma and Kennedy, 2016). در سامانه‌های تصفیه زمینی، مکانیسم‌های مختلف فیزیکی (ته‌نشینی و فیلتراسیون)، شیمیایی (جذب سطحی، تبادل یونی، رقیق‌سازی و ترسیب) و بیولوژیکی (تجزیه بیولوژیکی) به حذف آلاینده‌ها در هنگام عبور از خاک کمک می‌نمایند (Abel et al., 2014; Sharma et al., 2011).

استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این محیط خاک به عنوان یک محیط متخلخل می‌تواند کیفیت آب‌های نامناسب را بهبود دهد. هدف از این پژوهش امکان‌سنجی استفاده دو ترازوی از ژئوکمپوزیت در کاربرد پساب و توانایی خاک در بهبود کیفیت پساب در حضور صفحات ژئوکمپوزیت بود.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور بررسی کارایی کاربردی دو ترازوی صفحات ژئوکمپوزیت در آبیاری با پساب، جمع‌آوری زه‌آب و اثر تصفیه زمینی بر پساب در دانشگاه شهرکرد انجام شد. شهرکرد دارای اقلیم نیمه‌مرطوب معتدل با تابستان‌های معتدل و زمستان‌های بسیار سرد است. میانگین سالانه دمای هوا در شهرکرد ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد است. در طول ۳۰ سال گذشته کمینه و بیشینه مطلق دمای ثبت شده در شهرکرد به ترتیب ۳۲ درجه سانتی‌گراد زیر صفر و ۴۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. سردترین و گرم‌ترین ماه‌های سال در شهرکرد به ترتیب دی و مرداد ماه می‌باشد. اگرچه در زمستان میزان رطوبت متوسط نسبتاً بالا است، میزان بارش در فصلی که کشت انجام می‌شود به جز فروردین تا خرداد ماه تقریباً نزدیک به صفر است (Hajhashemkhani et al., 2014).

پساب مورد استفاده در این پژوهش، از منهول فاضلاب دانشگاه شهرکرد تأمین شد. پساب پیش از استفاده، با عبور از صافی توری و سپس یک فیلتر سنی و یک فیلتر ژئوتکستایل مورد تصفیه ابتدایی قرار گرفت. استاندارد کیفی فاضلاب‌های تصفیه شده مورد استفاده در آبیاری و برخی ویژگی‌های پساب مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به استاندارد Ayers and Westcot (1985) مصرف پساب شهری دانشگاه شهرکرد در کشاورزی، از لحاظ نیترات و بی‌کربنات دارای محدودیت متوسط است و بر طبق استاندارد کمیسیون اروپا (Gharbi et al., 2010) پساب شهری دانشگاه شهرکرد از لحاظ شوری دارای محدودیت متوسط است. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ذکر شده است.

خاک و یا در ارتباط با مصالح خاکی با اهداف مختلفی همچون مسلح‌سازی، جداسازی، عایق‌بندی رطوبتی، مهار فرسایش، ایفای نقش صافی (فیلتر)، زهکشی و غیره به کار گرفته می‌شوند (Rahimi et al., 2004). ژئوکمپوزیت‌ها با ترکیب ورقه‌های مختلف ژئوستتیک مانند ژئوتکستایل-ژئونت، ژئوتکستایل-ژئوگرید، ژئوتکستایل-ژئوسل و غیره ساخته می‌شوند و اغلب از آن‌ها به عنوان فیلتر-زهکش استفاده می‌شود (Rahimi et al., 2004). سامانه‌های فیلتر-زهکش از یک سامانه ژئوکمپوزیت تشکیل شده‌اند که در آن یک یا دو لایه ژئوتکستایل به عنوان فیلتر و یک لایه ژئونت یا ژئوگرید برای زهکشی استفاده شده است. آبی که در اطراف فیلتر-زهکش ژئوکمپوزیت‌ها جمع می‌شود به صورت عمود بر صفحه‌های ژئوتکستایل وارد زهکش ژئونت شده و در جهت طولی آن از محیط خارج می‌شود (Rahimi et al., 2004). آبیاری زیرسطحی همراه با زمین‌بافت‌ها (ژئوستتیک‌ها) یا SSTI (Subsurface Textile Irrigation) یک روش خاص است که برای تمامی خاک‌ها از جمله خاک‌های ماسه‌ای تا خاک‌های رسی قابل کاربرد است. از مزایای SSTI کاهش مصرف آب، کود و علف‌کش‌ها است. در این سامانه آب و مواد غذایی به صورت مستقیم به منطقه ریشه تزریق می‌شود که این موضوع باعث افزایش عملکرد گیاه و سلامت آن‌ها خواهد شد. از مزایای دیگر این سامانه می‌توان به امکان استفاده از آب‌های بازیافت و یا تصفیه شده اشاره کرد. چرا که در این روش آب به سطح خاک نمی‌رسد (Abou Seeda et al., 2020). تأثیر شکل و نحوه قرارگیری صفحات ژئوکمپوزیت بر الگوی توزیع رطوبت در پژوهش Heshmati et al. (2017) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها از صفحات ژئوکمپوزیت به عنوان بخش آبدار سامانه آبیاری زیرسطحی در شرایط کاربرد پساب استفاده نمودند. نتایج نشان داد استفاده از صفحات ژئوکمپوزیت باعث کاهش سطح خیس‌شده زمین و افزایش حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل خاک در سطح یک درصد معنادار شد. بررسی منابع فوق نشان می‌دهد که استفاده از صفحات ژئوکمپوزیت بر الگوی توزیع رطوبت مؤثر است. همچنین، این صفحات به نوبه خود در بخش تصفیه قبلاً مورد

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی پساب مورد استفاده و مقایسه آن با استانداردهای موجود

Table 1- Some of the chemical properties of wastewater used in the experiment and its comparison with existing standards

| کمسیون اروپا | استاندارد فائو | | | ویژگی‌های پساب ورودی | | | واحد | ویژگی |
|--------------|----------------|---------------|--------------|----------------------|-------|--------|---|------------------------------------|
| | محدودیت زیاد | محدودیت متوسط | بدون محدودیت | میانگین | کمینه | بیشینه | | |
| 6.5-8.4 | | 6.5-8.4 | | 6.9 | 6.6 | 7.2 | - | pH |
| 0.3 | >3 | 0.7-3 | <0.7 | 0.67 | 0.56 | 0.79 | دسی‌زیمس بر متر | EC |
| 6.5 | | >3 | <3 | 1.4 | 1.26 | 1.58 | میلی‌اکی‌والان بر لیتر | Na ⁺ |
| - | - | - | - | 4.2 | 3 | 7.5 | میلی‌اکی‌والان بر لیتر | Ca ²⁺ +Mg ²⁺ |
| 6-12 | >9 | 3-9 | <3 | 1.05 | 0.92 | 1.21 | (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) ^{1/5} | SAR |
| - | >30 | 5-30 | <5 | 15.7 | 14.5 | 17 | میلی‌اکی‌والان بر لیتر | N-NO ₃ ⁻ |
| - | >8.5 | 1.5-8.5 | <1.5 | 4.41 | 3.5 | 6 | میلی‌اکی‌والان بر لیتر | HCO ₃ |
| - | - | - | - | 4.83 | 4.52 | 5.11 | میلی‌گرم بر لیتر | BOD ₅ |

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در پژوهش

Table 2- Some of the physical and chemical properties of soil used in the experiment

| بافت خاک | رس | شن | سیلت | جرم ویژه ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) | جرم ویژه حقیقی (گرم بر سانتی‌متر مکعب) | تخلخل (درصد) | pH | EC (دسی‌زیمنس بر متر) |
|----------|----|----|------|---|---|-----------------|-----|--------------------------|
| لومی | 15 | 43 | 42 | 1.48 | 2.63 | 56 | 7.9 | 0.2 |

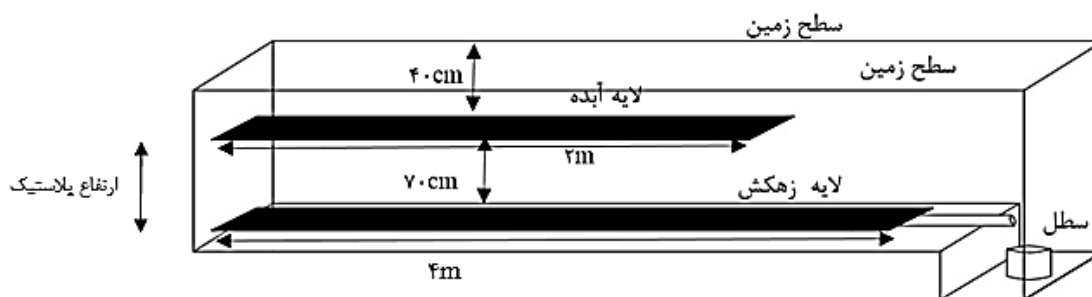
شامل یک لایه ژئونت در وسط و دو لایه ژئوتکستایل در طرفین بود (شکل سمت چپ) (شکل ۲). در هر دور آبیاری از پساب و زه‌آب نمونه‌برداری شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، مقادیر هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج، pH توسط دستگاه pH متر، سدیم از روش فلیم‌فتمتری، کلسیم و منیزیم و بی‌کربنات و کربنات به روش تیتراسیون، نیترات با روش اسپکتروفوتومتری و BOD₅ با استفاده از دستگاه BOD سنج اندازه‌گیری شد. سپس مقادیر SAR آب با استفاده از رابطه (۱) و مقادیر نمک ذخیره شده در خاک از رابطه (۲) محاسبه شد. لازم به ذکر است میزان پساب ورودی در هر مرحله از تزریق برای هر تکرار ۵۰۰ لیتر بود.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

$$\Delta S = C_i \cdot Ir - C_d \cdot Dw \quad (2)$$

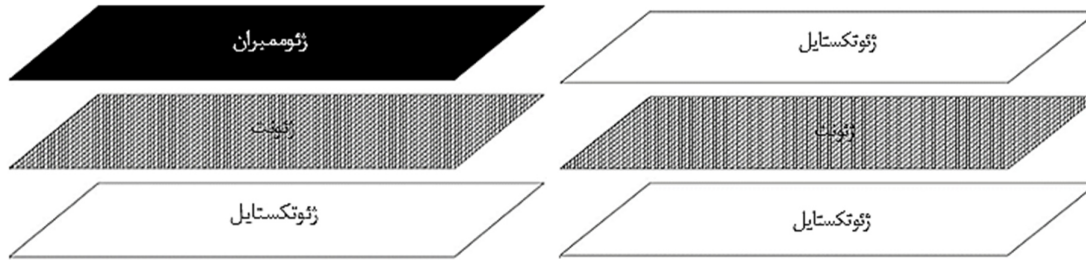
در آن‌ها SAR، نسبت جذب سدیمی (میلی‌اکی‌والان بر لیتر به توان ۰/۵)، Na⁺، Ca²⁺ و Mg²⁺ به ترتیب غلظت عناصر سدیم، کلسیم و منیزیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)، ΔS، میزان نمک ذخیره شده در خاک (میلی‌گرم)، Ir و Dw به ترتیب میزان آب آبیاری و آب زهکشی (لیتر) و C_d و C_i به ترتیب غلظت نمک‌ها در آب آبیاری و زهکشی (میلی‌گرم بر لیتر) است.

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار اجرا شد. مؤلفه‌های مورد مطالعه شامل مرحله تزریق پساب (زمان) در ۱۲ سطح و فاصله زهکش از لایه آبد در دو سطح با فاصله ۳۵ (D35) و ۷۰ (D70) سانتی‌متر بود. برای انجام آزمایش ترانسه‌هایی به طول چهار متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و عمق ۷۵ (D35) و ۱۱۰ (D70) سانتی‌متر در خاک حفر شد. کف و دیواره ترانسه‌ها با پلاستیک پوشانده و برای جلوگیری از جریان ترجیحی، دیواره‌های پلاستیک به گریس آغشته شد. سپس صفحات ژئوکمپوزیت به عنوان لایه زهکش در تراز دوم به طول چهار متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر کارگذاری شد. پس از آن مطابق با تیمار مورد نظر (ضخامت ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متر) روی زهکش تا عمق ۴۰ سانتی‌متری از سطح زمین، خاک الک شده ریخته شد. در مرحله بعد صفحات ژئوکمپوزیت به عنوان لایه آبد در تراز اول با طول دو متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر کارگذاری و روی لایه آبد تا سطح زمین خاک الک شده ریخته شد. برای سهولت کار، لایه زهکش در خروجی داخل لوله پولیکا شد تا خروج زه‌آب بهتر انجام شود و در زیر آن ظروفی برای جمع‌آوری زه‌آب قرار داده شد. شماتیک نحوه کارگذاری ژئوکمپوزیت‌های زهکش و آبد در تیمار D70 در شکل ۱ نشان داده شده است. ژئوکمپوزیت آبد شامل یک لایه ژئونت در وسط، یک لایه ژئوممبران در بالا و یک لایه ژئوتکستایل (شکل سمت راست) و ژئوکمپوزیت زهکش



شکل ۱- نحوه کارگذاری ژئوکمپوزیت‌ها (تیمار D70) و جمع‌آوری زه‌آب

Figure 1- The way of use of geocomposites (D70 treatment) and collecting drain water



شکل ۲- لایه تغذیه‌کننده آبد (راست) و لایه زهکش (چپ)

Figure 2- The aquifer feeding layer (right) and the drainage layer (left)

(2021) به نتایج مشابه دست یافتند. مقدار pH پساب در تمام دوره‌ها، کم‌تر از هفت بود که با توجه به خاصیت بافری خاک مقدار آن در زه‌آب به بیش از هفت افزایش یافت. افزایش pH پساب را می‌توان ناشی از وجود کانی‌های قلیایی در خاک دانست. علاوه‌براین، تغییرات pH در ناحیه غیراشباع خاک به فعالیت‌های میکروبی و واکنش‌های شیمیایی نیز بستگی دارد (Amin et al., 2021). طبق استاندارد فائو (Ayers and Westcot, 1985) استفاده از زه‌آب حاصل برای کشاورزی از لحاظ مقدار pH بدون محدودیت است. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر درصد تغییرات pH پساب جدول ۳ نشان داد که اثر مرحله تزریق پساب، کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر درصد تغییرات pH معنادار نبود. دو تیمار D35 و D70 به‌طور میانگین میزان pH پساب را به ترتیب ۱۰/۵۸ و ۸/۷۰ درصد افزایش داده‌اند؛ اما از لحاظ آماری تفاوتی میان دو تیمار مشاهده نشد (جدول ۴). علاوه‌براین تغییرات pH پساب تحت تأثیر مرحله تزریق و یا به‌عبارت دیگر زمان قرار نگرفت (جدول ۴).

پس از جمع‌آوری اطلاعات فوق، درصد تغییرات متغیرهای کیفی آب در هر مرتبه آزمایش با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد و روند تغییرات این پارامترها در طول دوره پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

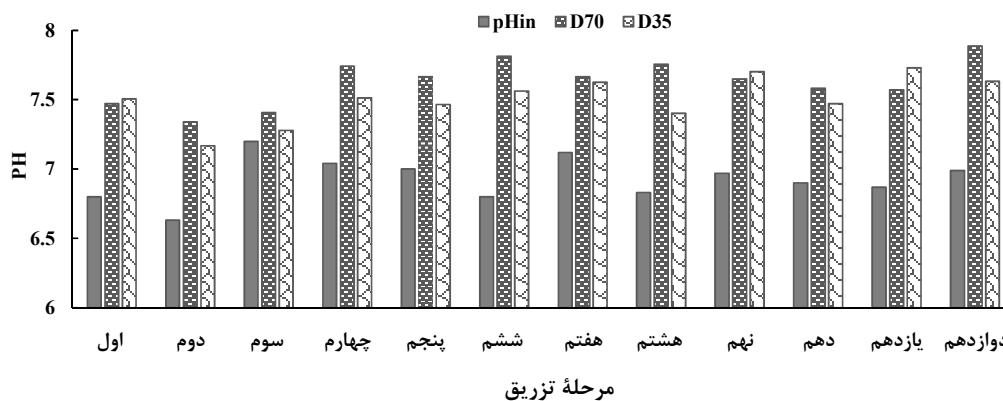
$$\text{درصد تغییرات} = \frac{\text{پارامتر ورودی} - \text{پارامتر خروجی}}{\text{پارامتر ورودی}} \times 100 \quad (3)$$

تحلیل‌های آماری بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی انجام گرفت. تحلیل درصد تغییرات متغیرهای اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار آماری STATISTICA انجام شد. جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. برای ترسیم شکل‌ها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- pH زه‌آب

نتایج نشان داد که در کلیه دوره‌ها pH زه‌آب از pH پساب بیش‌تر بود (شکل ۳). در پژوهش‌هایی، Hajhashemkhani et al. (2014)، و Taheri-Sodejani et al. (2015) و Amin et al.



شکل ۳- pH پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 3- pH of wastewater and drain water in different stages of injection

جدول ۳- تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر حجم و درصد تغییرات شاخص‌های کیفیت زه‌آب
Table 3- Analysis of variance of the effect of wastewater injection stage, the depth of the drainage, and their interaction on the volume and changes in the quality indicators of the drain water

| میانگین مربعات | | | | | | | | | | درجه آزادی | منابع تغییر |
|----------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------|--------------------------------------|
| BOD ₅ | NO ₃ ⁻ | SAR | Ca ²⁺ + Mg ²⁺ | Na ⁺ | HCO ₃ ⁻ | ΔV | Δsalt | EC | pH | | |
| 18711 ^{ns} | 345.56 ^{**} | 37.82 ^{ns} | 7141.0 ^{**} | 19.32 ^{ns} | 640.47 [*] | 166.40 ^{**} | 8134.50 ^{**} | 1712.13 ^{**} | 12.46 ^{ns} | 3 | مرحله تزریق پساب (زمان) |
| 38.97 ^{ns} | 166.51 [*] | 65.43 ^{ns} | 5117.8 ^{**} | 68.51 ^{ns} | 3084.74 ^{**} | 128.68 ^{**} | 0.80 ^{ns} | 1179.36 ^{**} | 19.42 ^{ns} | 1 | عمق کارگذاری زهکش |
| 235.62 ^{ns} | 12.75 ^{ns} | 3.01 ^{ns} | 317.4 ^{ns} | 2.03 ^{ns} | 22.60 ^{ns} | 2.03 ^{ns} | 140.70 ^{ns} | 171.81 ^{**} | 1.58 ^{ns} | 3 | مرحله تزریق پساب × عمق کارگذاری زهکش |
| 226.84 | 32.94 | 22.49 | 337.9 | 39.76 | 142.07 | 15.36 | 61.00 | 41.20 | 6.64 | 16 | خطا |

^{ns} بیان‌گر عدم تفاوت معنادار و * و ** به ترتیب بیان‌گر تفاوت معنادار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد است.

جدول ۴- مقایسه میانگین درصد تغییرات حجم و ویژگی‌های شیمیایی زه‌آب در عمق‌های مختلف کارگذاری لایه زهکش

Table 4- Comparison of the mean value of changes in the volume and chemical characteristics of drain water in the different depths of the drainage

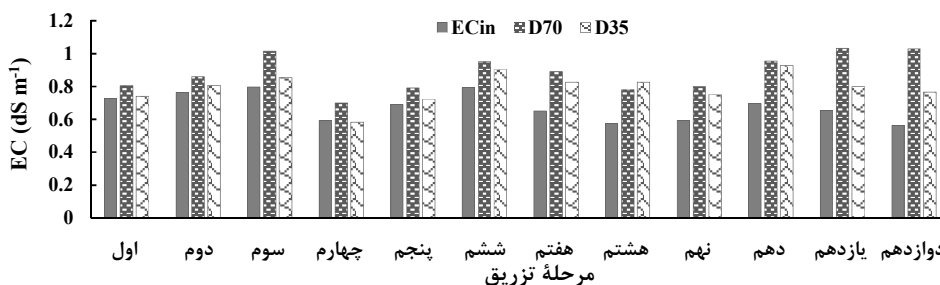
| میانگین درصد تغییرات ویژگی‌های شیمیایی زه‌آب | | | | | | | | | | عمق کارگذاری زهکش (سانتی‌متر) |
|--|---------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--|-------------------------------|
| ΔV | BOD ₅ | NO ₃ ⁻ | SAR | Ca ²⁺ + Mg ²⁺ | Na ⁺ | HCO ₃ ⁻ | EC | pH | | |
| -61.72 ^a | -16.36 ^a | -19.80 ^a | -49.5 ^a | 161.9 ^a | -19.28 ^a | 31.97 ^a | 31.34 ^a | 10.58 ^a | | 70 |
| -57.1 ^b | -13.87 ^a | -14.65 ^b | -50.75 ^a | 138.1 ^b | -15.71 ^a | 9.52 ^b | 17.91 ^b | 8.70 ^a | | 35 |

بین تیمارهایی که حرف مشترک دارند بر اساس آزمون دانکن تفاوت معناداری وجود ندارد.

افزایش مراحل تزریق پساب به خاک به صورت معنادار افزایش یافته است (شکل ۴). در این راستا، Javani et al. (2015) نیز مشاهده نمودند که شوری زه‌آب خروجی از ستون‌های خاک به مرور زمان افزایش یافت و نتیجه گرفتند که با گذشت زمان بر تجمع نمک در خاک افزوده شده و با افزایش زمان کاربرد فاضلاب، مقدار شوری نمونه‌های خروجی افزایش می‌یابد. میانگین تغییرات هدایت الکتریکی در تیمار D70 و D35 به ترتیب ۳۱/۳۴ و ۱۷/۹۱ درصد محاسبه شد و تفاوت میان تیمارها معنادار بود (جدول ۴). این تفاوت احتمالاً به دلیل طول مسیر بیشتر پساب در پروفیل خاک و حجم کمتر زه‌آب در تیمار D70 بود که در نتیجه، میزان شوری زه‌آب خروجی از آن افزایش بیش‌تری نشان داد. بیش‌ترین مقدار هدایت الکتریکی در میانگین کل مراحل تزریق مربوط به تیمار D70 (۰/۸۸ دسی‌زیمنس بر متر) و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار D35 (۰/۷۹ دسی‌زیمنس بر متر) بود. طبق استاندارد فانو (Ayers and Westcot, 1985) از لحاظ مقدار هدایت الکتریکی، زه‌آب حاصل دارای محدودیت متوسط برای استفاده در کشاورزی است.

۳-۲- هدایت الکتریکی (EC) زه‌آب

مقدار شوری پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق در شکل ۴ نشان داده شده است. در تمامی مراحل تزریق، میزان هدایت الکتریکی پساب کمتر از زه‌آب بود که نشان می‌دهد هدایت الکتریکی پساب بر اثر عبور از خاک افزایش یافته است. در این زمینه، Taheri-Sodejani et al. (2021)، Amin et al. (2021)، Hajhashemkhani et al. (2014) و Christen et al. (2015)، (2010) به نتایج مشابه دست یافتند. برای نمونه، Christen et al. (2010) افزایش شوری زه‌آب در تصفیه زمینی را ناشی از کسر آبشویی دانستند. به عبارت دیگر، با توجه به این که حجم زه‌آب کمتر از پساب بود، انتظار می‌رود که شوری زه‌آب افزایش یابد. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر درصد تغییرات هدایت الکتریکی پساب جدول ۳، نشان داد که اثر عمق کارگذاری زهکش و مرحله تزریق پساب بر تغییرات هدایت الکتریکی پساب در سطح یک درصد معنادار بود. میانگین هدایت الکتریکی زه‌آب به تدریج و با



شکل ۴- هدایت الکتریکی پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 4- Electrical conductivity of wastewater and drain water in different stages of injection

۳-۳- بیان نمک

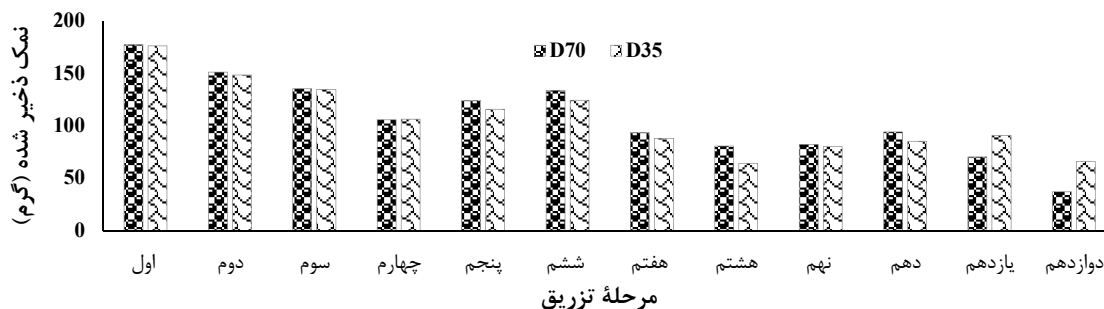
زه‌آب خروجی از تمامی تیمارها افزایش یافته و در نهایت به مقدار تقریباً ثابتی رسیده است (شکل ۵). شکل ۶ میزان نمک ذخیره شده در خاک در هر مرحله از تزریق را نشان می‌دهد. در تمامی مراحل، ذخیره نمک در خاک مشاهده شد. این امر احتمالاً به دلیل حجم کم زه‌آب نسبت به پساب بود. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر مقدار نمک ذخیره شده در خاک نشان می‌دهد که اثر مرحله تزریق پساب بر مقادیر نمک ذخیره شده در خاک در سطح یک درصد معنادار بود (جدول ۳). با توجه به این که مقدار زه‌آب با افزایش مراحل تزریق افزایش یافته و به مقدار تقریباً ثابتی نزدیک شده است، مقدار نمک ذخیره شده در خاک به مرور زمان به صورت معنادار کاهش یافته است (شکل ۵).

شکل ۵ حجم پساب و زه‌آب را در مراحل مختلف تزریق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در تمامی مراحل تزریق حجم پساب از زه‌آب بیش‌تر بود. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر تغییرات حجم زه‌آب نشان داد که عمق کارگذاری زهکش و مرحله تزریق پساب بر تغییرات حجم زه‌آب در سطح یک درصد تأثیر معنادار داشت (جدول ۳). همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، حجم زه‌آب خروجی از تیمار D70 در طول دوره پژوهش نسبت به تیمار D35 به صورت معنادار کم‌تر بود. با افزایش مرحله تزریق پساب، حجم



شکل ۵- حجم پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 5- Volume of wastewater and drain water in different stages of injection



شکل ۶- مقادیر مطلق نمک ذخیره‌شده در خاک در مراحل مختلف تزریق

Figure 6- Absolute amounts of salt stored in the soil at different stages of injection

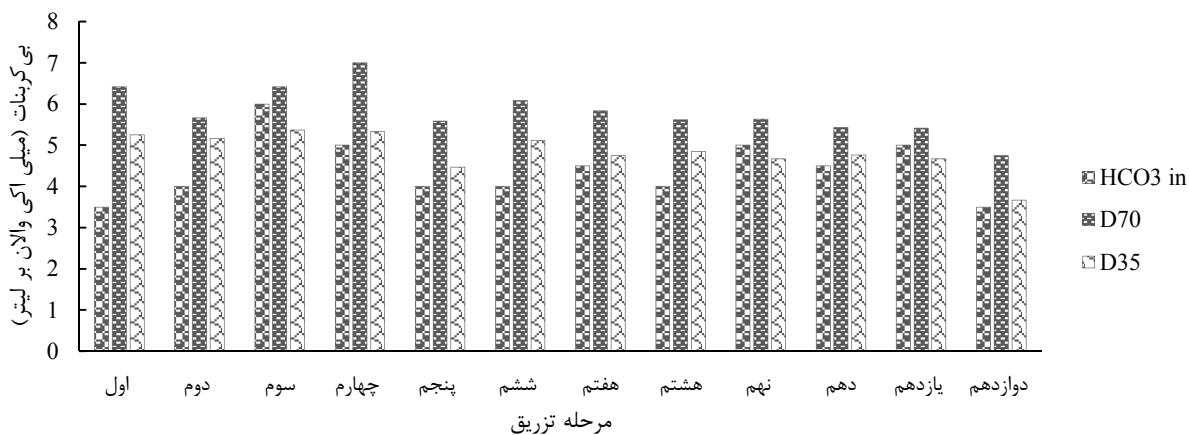
پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر درصد تغییرات بی‌کربنات (جدول ۳) نشان داد که اثر مرحله تزریق پساب و عمق کارگذاری زهکش بر درصد تغییرات بی‌کربنات به ترتیب در سطح پنج و یک درصد معنادار بود. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است به تدریج و با افزایش مراحل تزریق پساب، تغییرات بی‌کربنات و اختلاف مقدار بی‌کربنات در پساب و زه‌آب کاهش یافته است. تغییرات بی‌کربنات در خاک به عوامل مختلفی از جمله pH و واکنش

۳-۴- بی‌کربنات زه‌آب

با توجه به این که pH پساب در تمام طول دوره مطالعه کم‌تر از ۸/۳ بود؛ مقادیر کربنات پساب ناچیز بود و تنها بی‌کربنات در نمونه‌های پساب و زه‌آب مشاهده شد. مقادیر مطلق بی‌کربنات در مراحل مختلف تزریق در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بیش‌تر موارد میزان بی‌کربنات در زه‌آب نسبت به پساب، افزایش یافته است. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق

بنابراین، توانایی خاک در کاهش بی‌کربنات نیز کاهش می‌یابد. دو تیمار D70 و D35 مقدار بی‌کربنات زه‌آب را به‌طور میانگین به‌ترتیب ۳۱/۹۷ و ۹/۵۲ درصد نسبت به پساب افزایش دادند. اختلاف درصد تغییرات بی‌کربنات در بین تیمارهای مورد مطالعه در سطح یک درصد معنادار بود (جدول ۴).

نمک‌ها در خاک بستگی دارد. بخشی از بی‌کربنات خاک می‌تواند درون حفره‌های خاک محبوس شود که با گذر زمان توانایی خاک برای به تله انداختن بی‌کربنات کاهش می‌یابد. بخش دیگری احتمالاً با نمک‌های کلسیم و منیزیم تشکیل رسوب داده است. با کاهش میزان نمک‌ها، پتانسیل رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد.



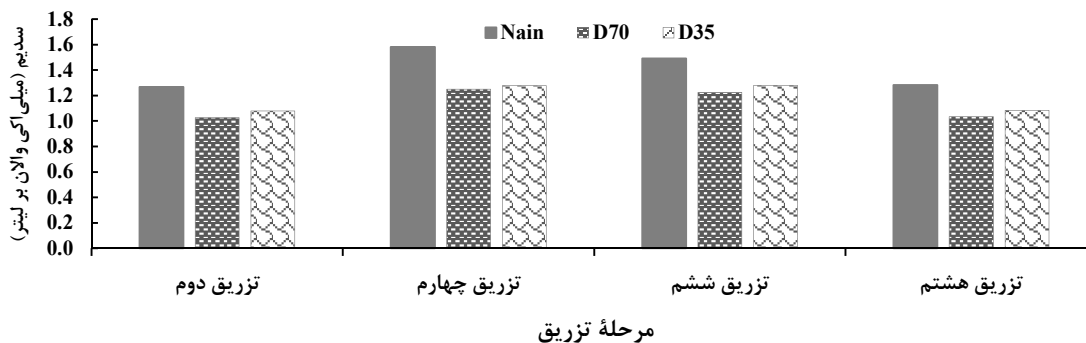
شکل ۷- بی‌کربنات پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 7- Bicarbonate of wastewater and drain water in different stages of injection

تغییرات سدیم نشان داد که اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و نیز برهم‌کنش آن‌ها بر تغییرات سدیم معنادار نبود (جدول ۳). با توجه به تغییرات کم pH زه‌آب، تغییرات مقدار سدیم پساب نیز معنادار نبود و نتایج با هم مطابقت داشت. در تیمارهای D70 و D35 میزان سدیم زه‌آب به‌طور میانگین به‌ترتیب ۱۹/۲۹ و ۱۵/۷۱ درصد نسبت به پساب، کاهش یافت؛ اما میان دو تیمار تفاوت معناداری از لحاظ آماری مشاهده نشد (جدول ۴). مطابق با استاندارد فائو (Ayers and Westcot, 1985) استفاده از زه‌آب حاصل در کشاورزی از نظر میزان سدیم بدون محدودیت است.

۳-۵- سدیم زه‌آب

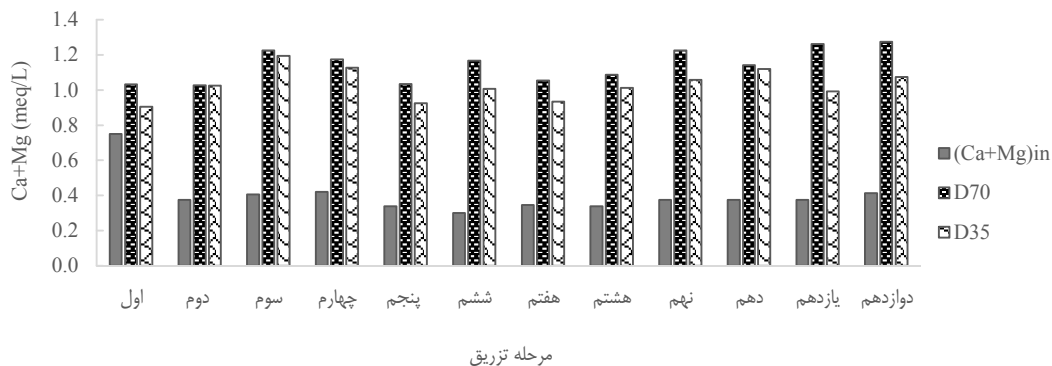
مقدار سدیم پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان سدیم پساب همواره بیش‌تر از میزان آن در زه‌آب بود. در مطالعاتی، Taheri-Sodejani et al. (2014)، Hajhashemkhani et al. (2014) و Amin et al. (2021) نیز به نتایج مشابه دست یافتند. در هر دو تیمار جذب سدیم توسط خاک مشاهده شد و خاک به سمت سدیمی شدن پیش رفته است. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر درصد



شکل ۸- سدیم پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 8- sodium of wastewater and drain water in different stages of injection

دانست. کاهش سدیم در زه آب نیز احتمالاً به دلیل جایگزین شدن سدیم پساب با کلسیم و منیزیم خاک است. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم کنش آن‌ها بر مجموع کلسیم و منیزیم نشان داد که اثر مرحله تزریق پساب و عمق کارگذاری زهکش بر درصد تغییرات مجموع کلسیم و منیزیم در سطح یک درصد معنادار بود. با افزایش مراحل تزریق پساب میزان کلسیم و منیزیم زه آب افزایش یافته است (جدول ۳، شکل ۹). با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، میزان کلسیم و منیزیم زه آب در تیمارهای D70 و D35 به‌طور میانگین به ترتیب ۱۶۱/۹ و ۱۳۸/۱ درصد نسبت به پساب افزایش یافته است. اختلاف بین مقادیر کلسیم و منیزیم در میان این دو تیمار نیز از لحاظ آماری معنادار بود (جدول ۴).



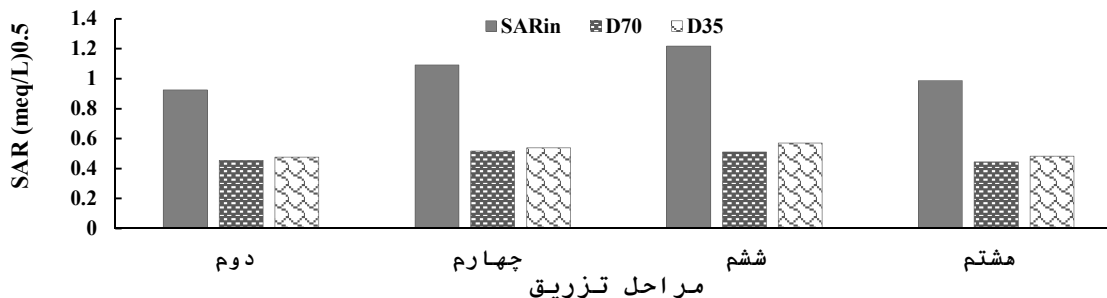
شکل ۹- مجموع کلسیم و منیزیم پساب و زه آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 9- Total calcium and magnesium of wastewater and drain water in different stages of injection

منتقل می‌شود. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم کنش آن‌ها بر درصد تغییرات SAR نشان داد (جدول ۳) که اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم کنش آن‌ها بر تغییرات SAR معنادار نبود. دو تیمار D70 و D35 میزان SAR خروجی را به ترتیب ۵۴/۲۹ و ۵۰/۷۵ درصد کاهش دادند. با این حال، اختلاف بین دو تیمار از لحاظ آماری معنادار نبود (جدول ۴). استفاده از زه آب حاصل برای آبیاری بر اساس میزان SAR، مطابق استاندارد فائو (Ayers and Westcot, 1985) بدون محدودیت است.

۷-۳- نسبت جذب سدیم (SAR) زه آب

مقادیر SAR پساب و زه آب در مراحل مختلف تزریق در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر این اساس، میزان SAR در زه آب به دلیل کاهش میزان سدیم و افزایش مجموع کلسیم و منیزیم زه آب در کلیه تیمارها، کم‌تر از میزان آن در پساب بود. در این زمینه، Hosseinpour et al. (2009) بیان کردند میزان سدیم بیشتر در پساب می‌تواند تعادل طبیعی کاتیون‌های خاک را از بین ببرد و سبب جایگزینی آن با کاتیون‌های دیگر به‌ویژه کلسیم و منیزیم موجود روی سطوح قابل تبادل خاک شود که به موجب آن مقدار بیش‌تری کلسیم و منیزیم وارد محلول خاک شده و بر اثر آب‌شویی به زه آب‌ها



شکل ۱۰- SAR پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 11- SAR of wastewater and drain water in different stages of injection

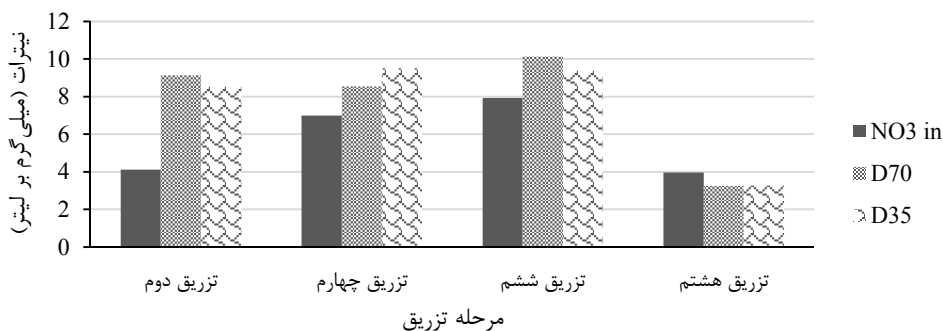
مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر درصد تغییرات نیترات نشان داد (جدول ۳) که اثر مرحله تزریق پساب و عمق کارگذاری زهکش در تغییرات نیترات به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنادار بود. در طول دوره پژوهش با افزایش مراحل تزریق تغییرات نیترات پساب در اثر عبور از خاک، کاهش یافت (شکل ۱۱). به عبارتی، توانایی خاک برای حذف نیترات از پساب، به تدریج کاهش یافته است. در پژوهشی، Javani et al. (2014) نیز به نتایج مشابه دست یافتند. همچنین، Hosseinpour et al. (2009) نیز مشاهده نمودند که با استمرار کاربرد فاضلاب میزان نیترات خروجی از زهکش‌ها افزایش یافت. دو تیمار D70 و D35 میزان نیترات پساب را به طور میانگین به ترتیب ۱۹/۸۱ و ۱۴/۶۵ درصد کاهش داده‌اند و اختلاف بین آن‌ها از لحاظ آماری معنادار بود (جدول ۴). حذف به طور میانگین ۱۴/۶۵ درصد نیترات پساب در لایه ۳۵ سانتی‌متر سطحی خاک (D35) و ۵/۱۶ درصد در لایه ۳۵ سانتی‌متر زیرین (حذف ۱۹/۸۱ درصد نیترات در کل لایه ۷۰ سانتی‌متری خاک (D70))، همان‌طور که Mienis and Arye (2018) نیز نشان دادند، بر نقش به‌سزای لایه‌های سطحی‌تر در فرآیند حذف نیترات از پساب اشاره دارد.

۳-۸- کلاس‌بندی زه‌آب از لحاظ شوری

شوری و SAR زه‌آب در تیمار D70 به ترتیب ۸۸/۴۸ (میکروموس بر متر) و ۰/۴۸ (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) به ترتیب ۷۹/۲۸ (میکروموس بر متر) و ۰/۵۱ (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) به توان ۰/۵ بود. بر طبق نمودار ویل کاکس که توسط آزمایشگاه شوری خاک آمریکا برای طبقه‌بندی کیفی آب پیشنهاد شده است. هر دو زه‌آب در کلاس C1-S1، آب با شوری و سدیمی کم، قرار گرفته و برای کشاورزی مناسب هستند.

۳-۹- نیترات زه‌آب

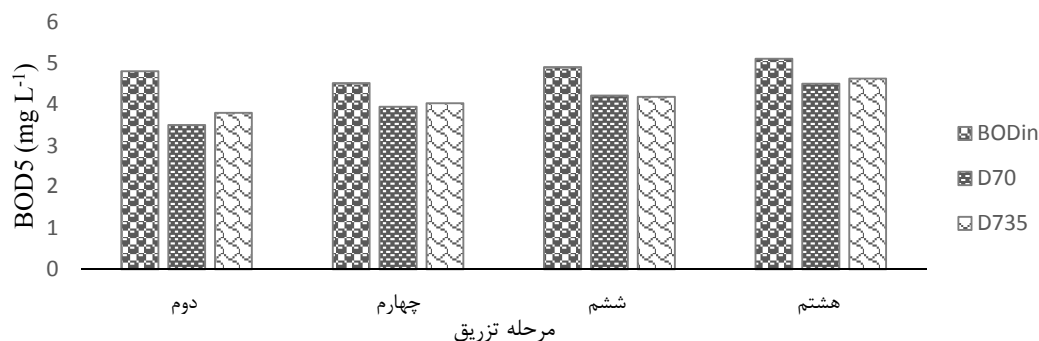
میزان نیترات در پساب همواره بیش‌تر از میزان آن در زه‌آب بود (شکل ۱۱). همچنین، میزان نیترات زه‌آب در تیمار D70 در کلیه مراحل تزریق کم‌تر از تیمار D35 بود. به‌طور کلی نتایج بیان‌گر قابلیت تصفیه زمینی در حذف نیترات از پساب و بهبود این پارامتر است. بر اساس مقادیر نیترات زه‌آب و مطابق با استاندارد فائو (Ayers and Westcot, 1985) استفاده از زه‌آب حاصل برای آبیاری دارای محدودیت متوسط است. نتایج تحلیل واریانس اثر



شکل ۱۱- نیترات پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 11- Nitrate of wastewater and drain water in different stages of injection

وجود اکسیژن محلول و شرایط تجزیه هوازی در خاک است و در ۱۰ سانتی‌متر اول بیش‌ترین میزان اکسیژن محلول در خاک وجود دارد، بخش قابل‌توجهی از حذف BOD₅ در این ناحیه اتفاق می‌افتد. با توجه به این‌که در این پژوهش پساب به‌وسیله صفحات ژئوکمپوزیت در عمق ۴۰ سانتی‌متری زمین رها شد و در این ناحیه میزان اکسیژن محلول کم‌تر از سطح خاک است. بنابراین، کاهش قابل‌توجه در میزان BOD₅ پساب در طی تصفیه زمینی مشاهده نشد. BOD₅ زه‌آب در تیمارهای D70 و D35 به‌طور میانگین به‌ترتیب ۱۶/۳۶ و ۱۳/۸۷ درصد نسبت به پساب کاهش پیدا کرد؛ اما تفاوت بین دو تیمار معنادار نبود (جدول ۴). حذف به‌طور میانگین ۱۳/۸۷ درصد از BOD₅ پساب در اثر عبور از لایه ۳۵ سانتی‌متر سطحی‌تر خاک (D35) و ۲/۴۹ درصد در لایه ۳۵ سانتی‌متر زیرین (حذف به‌طور میانگین ۱۶/۳۶ درصد BOD₅ پساب در کل لایه به ضخامت ۷۰ سانتی‌متری خاک (D70))، همان‌طور که Amin et al. (2021) گزارش کردند که بخش قابل‌توجهی از حذف BOD₅ در سامانه تصفیه زمینی در لایه‌های سطحی‌تر خاک انجام می‌شود. آن‌ها این پدیده را ناشی از فعالیت‌های بیولوژیکی هوازی در فرآیند تجزیه زیستی دانستند.



شکل ۱۲- BOD₅ پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق

Figure 12- BOD₅ of wastewater and drain water in different stages of injection

۷۰ و ۳۵ سانتی‌متر به‌ترتیب موجب کاهش ۱۹/۲۸ و ۱۵/۷۱ درصد سدیم، ۱۶/۳۶ و ۱۳/۸۷ درصد BOD₅، و ۵۴/۲۹ و ۵۰/۷۵ درصد SAR و افزایش ۱۰/۵۸ و ۸/۷ درصد pH در زه‌آب نسبت به پساب شد. با این حال درصد تغییرات این شاخص‌ها در بین دو تیمار با فاصله ۷۰ و ۳۵ سانتی‌متر بین لایه آبد و لایه زهکش تفاوت معنادار نشان نداد. با توجه به نتایج این آزمایش کاربرد لایه زهکش در ۳۵ سانتی‌متری لایه آبد، وضعیت بهتری برای شرایط پساب جهت کاربرد مجدد به‌وجود آورده است و می‌توان برای شرایطی که حجم زه‌آب زیاد نمی‌باشد این فاصله را توصیه نمود. در این شرایط به‌نظر

۱۰-۳- اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD₅) زه‌آب

شکل ۱۲ میزان BOD₅ را در پساب و زه‌آب نشان می‌دهد. در تمامی مراحل تزریق میزان BOD₅ در پساب بیش‌تر از مقدار آن در زه‌آب بود که نشان می‌دهد خاک قادر به کاهش میزان BOD₅ است. نتایج تحلیل واریانس اثر مرحله تزریق پساب، عمق کارگذاری زهکش و برهم‌کنش آن‌ها بر درصد تغییرات BOD₅ (جدول ۳) نشان داد که اثر مرحله تزریق پساب بر تغییرات BOD₅ در سطح پنج درصد معنادار بود. تغییرات BOD₅ پساب و زه‌آب در مراحل مختلف تزریق در شکل ۱۲ نشان داده شده است. به مرور زمان و با افزایش دفعات تزریق پساب، توانایی خاک در حذف BOD₅ کاهش یافت. این در حالی است که Chen et al. (2008) میزان BOD₅ خروجی از سامانه تصفیه زمینی را ثابت بیان کردند. با افزایش مرحله تزریق پساب میزان BOD₅ خروجی از تمامی تیمارها افزایش یافت، که با نتایج Javani et al. (2014) و Taheri-Sodejani et al. (2015) مطابقت داشت. در پژوهشی Essandoh et al. (2011) به بررسی حذف آلاینده‌ها از پساب با استفاده از ستون خاک پرداختند و بیان کردند که با توجه به این‌که کاهش BOD₅ در خاک ناشی از

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور بررسی توانایی خاک در بهبود کیفیت پساب در حضور صفحات ژئوکمپوزیت انجام شد. به‌طور کلی عبور پساب از لایه خاک باعث افزایش pH، شوری، مجموع کلسیم و منیزیم و بی‌کربنات و کاهش سدیم، نیتрат، BOD₅ و SAR پساب شد. در این میان، تیمار با ضخامت ۷۰ سانتی‌متر باعث افزایش معنادار شوری، بی‌کربنات و مجموع کلسیم و منیزیم زه‌آب نسبت به پساب شد. میزان نیترات زه‌آب نیز در تیمار با ضخامت ۷۰ سانتی‌متر نسبت به تیمار دیگر کاهش یافت. علاوه‌براین، تصفیه زمینی در تیمارهای با ضخامت

گیاه وتی‌ور برای تصفیه تکمیلی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری غرب اهواز. *مجله دانشگاه علوم پزشکی سبزوار*، ۳۰(۴)، ۵۱۱-۵۲۰. جوانی، حمیدرضا، لیاقت، عبدالمجید، حسن‌اقلی، علیرضا، و نادری‌درباغشاهی، مهدی (۱۳۹۴). استفاده از تصفیه زمینی در کاهش برخی از ترکیبات پساب شهری با استفاده از ستون خاک. *پژوهش آب/ایران*، ۹(۲)، ۱۳۷-۱۴۷.

حاج‌هاشم‌خانی، مریم، قبادی‌نیا، مهدی، طباطبایی، سیدحسن، حسین‌پور، علیرضا، و هوشمندگوچی، سعداله (۱۳۹۲). تاثیر روش کاربرد ژئولیت اصلاح‌شده بر کیفیت پساب شهری خروجی و نفوذپذیری خاک. *آب و خاک*، ۳۸(۳)، ۵۸۷-۵۹۶. doi:10.22067/jsw.v0i0.26564
حسین‌پور، اعظم، حق‌نیا، غلامحسین، علیزاده، امیر، و فتوت، امیر (۱۳۸۸). بررسی تغییرات کیفیت شیمیایی فاضلاب خام و پساب شهری در اثر عبور از ستون‌های خاک. *آب و خاک*، ۲۳(۳)، ۴۵-۵۶. doi:10.22067/jsw.v0i0.2283

حشمتی، فاطمه، قبادی‌نیا، مهدی، نوری امام‌زاده‌ای، محمدرضا، و طباطبایی، سیدحسن (۱۳۹۶). تأثیر کاربرد صفحات ژئوکمپوزیت بر پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری زیرسطحی. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۷(۲)، ۴۱-۵۲. doi:20.1001.1.22517480.1396.7.2.4.6

رحیمی، حسن، قبادی‌نیا، مهدی، و احمدی، حجت (۱۳۸۳). کاربرد مواد ژئوسنتتیک به‌عنوان زهکش زیر پوشش کانال‌ها. کارگاه سیستم زهکشی زیر پوشش کانال‌ها، تهران.

طباطبائی، سیدحسن، گوگوجانی، سجاد، قبادی‌نیا، مهدی، متقیان، حمیدرضا و عسگری، عظیمه (۱۴۰۲). اثر کاربرد دو ترازوی صفحات ژئوکمپوزیت بر ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک در شرایط استفاده از فاضلاب. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، انتشار برخط. doi:10.22098/mmws.2023.13904.1372

نجفی، پیام، موسوی، سیدفرهاد، و فیضی، محمد (۱۳۸۴). بررسی اثرات کاربرد پساب فاضلاب تصفیه شده شهری در روش‌های مختلف آبیاری سیب زمینی. *علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۲(۱)، ۶۱-۷۰.

می‌رسد عبور پساب از لایه خاک با فاصله ۳۵ سانتی‌متری توانسته به بهبود شرایط پساب در برخی موارد کمک نماید. در مقابل با توجه به نتایج، به‌نظر می‌رسد که کاربرد پساب آغازگر روند تخریب خاک نیز می‌تواند باشد که باید برای آن راه‌حلی در پژوهش‌های آینده یافت.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسؤل در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

سجاد گوگوجانی: انجام آزمایش‌ها، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **مهدی قبادی‌نیا:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **سیدحسن طباطبائی:** مشاوره، بازبینی متن مقاله؛ **حمیدرضا متقیان:** مشاوره؛ **عظیمه عسگری:** تکمیل تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، ویرایش مقاله.

منابع

ترابی‌فر، مریم، جعفرزاده حقیقی‌فرد، نعمت‌اله، تکدستان، افشین، جعفرنژادی، علیرضا، و افشار امیرمعهود (۱۳۹۳). عمکرد سیستم تصفیه زمینی و

References

- Abel, C.D.T., Sharma, S.K., Mersha, S.A., & Kennedy, M.D. (2014). Influence of intermittent infiltration of primary effluent on removal of suspended solids, bulk organic matter, nitrogen and pathogens indicators in a simulated managed aquifer recharge system. *Journal of Ecological Engineering*, 64, 100e107. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.12.045
- Abou Seeda, M.A., Hammad, S.A., Yassen, A.A., & Abou El-Nour, E.A. (2020). Evaluation and optimization of Subsurface Irrigation (SDI) system: A review. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 10(3), 503-534. doi:10.36632/mejas/2020.10.3.45
- Aharoni, A., Guttman, J., Cikurel, H., & Sharma, S. (2011). Guidelines for design, operation and maintenance of SAT (And Hybrid SAT) Systems. MEKOROT and UNESCO-IHE. Deliverable number 3.2.1.f - i, EU SWITCH Project. http://www.switchurbanwater.eu/outputs/pdfs/W3-2_GEN_RPT_D3.2.1f-i_Guidelines_for_design_of_SAT_systems.pdf.
- Amin, H.M., Gad, A.A.M., El-Rawy, M., Abdelghany, U.A., & Sadeek, R.A. (2021). Assessment of wastewater contaminant concentration through the vadose zone in a soil aquifer treatment system. *Applied Ecology and Environmental Research*, 19(3), 2385-2403. doi:10.15666/aecer/1903_23852403
- Ayers R.S., & Westcot, D.W. (1985). Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper. No 29. FAO. Rome. Italy. <https://www.fao.org/4/t0234e/t0234e00.htm>
- Chen, Z., Chen, M.B., Zhou, J.B., Li Zhou, Z.Y., Xi, X.R., Lin, C., & Chen, G.Q. (2008). A vertical subsurface-flow constructed wetland in Beijing. *Communications in Nonlinear Science, and Numerical Simulations*, 13(9), 1986-1997. doi:10.1016/j.cnsns.2007.02.009
- Christen, E.W., Quayle, W.C., Marcoux, M.A., Arienzo, M., & Jayawardane, N.S. (2010). Winery wastewater treatment using the land filter technique. *Journal of Environmental Management*, 91, 1665-1673. doi:10.1016/j.jenvman.2010.03.006
- Essandoh, H.M.K., Tizaoui, C., Mohamed, M.H.A., Amy, G., & Brdjanovic, D. (2011). Soil aquifer treatment of artificial wastewater under saturated conditions. *Water Research*, 45(11), 4211-4226. doi:10.1016/j.watres.2011.05.017
- Forslund, A., Ensink, J.H.J., Battilani, A., Kljujev, I., Golae, S., Raicevic, V., Jovanovic, Z., Stikic, R., Sandei, L., Fletcher, T., & Dalsgaard, A. (2010). Fecal contamination and hygiene aspect associated with the use of treated wastewater and canal water for irrigation of potatoes (*Solanum tuberosum*). *Agricultural Water Management*, 98(3), 440-450. doi:10.1016/j.agwat.2010.10.007
- Garcia, X., & Pargament, D. (2015). Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 154-166. doi:10.1016/j.resconrec.2015.05.015
- Gharbi, L.T., Merdy, p., Raynaud, M., Pfeifer, H.R., & Lucas, Y. (2010). Effects of longterm irrigation with treated wastewater. Part I: Evolution of soil physic-chemical properties. *Applied Geochemistry*, 25(2), 1703-1710. doi:10.1016/j.apgeochem.2010.08.018
- Hajhashemkhani, M., Ghobadi Nia, M., Tabatabaei, S.H., Hosseinpour, A., & Houshmand, S. (2014). Influence of modified zeolite in combine with soil on permeability and quality of urban wastewater. *Water and Soil*, 28(3), 586-595. doi:10.22067/jsw.v0i0.26564. [In Persian]
- Heshmati, F., Ghobadina, M., Nouri, M.R., & Tabatabaei, S.H. (2017). The effect of geocomposite sheets on the wetting pattern in subsurface irrigation system. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(2), 41-52. doi:20.1001.1.22517480.1396.7.2.4.6. [In Persian]
- Hosseinpour, A., Haghnia, G.H., Alizadeh, A., & Fotovvat, A. (2009). Changes in chemical quality of percolating raw and treated municipal wastewaters through soil columns. *Water and Soil*, 22(2), 45-56. [In Persian] doi:10.22067/jsw.v0i0.2283
- Javani, H.R., Liaghat, A., Hassanoghli, M., & Naderi Darbaghshahi, M. (2015). Application of soil treatment in reducing some compositions in urban retreated wastewater using soil column. *Iranian Water Resource Journal*, 9(2), 137-147. [In Persian]
- Mienis, O., & Arye, G. (2018). Long-term nitrogen behavior under treated wastewater infiltration basins in a soil aquifer treatment (SAT) system. *Water Research*, 134, 192-199. doi:10.1016/j.watres.2018.01.069
- Najafi, P., Mousavi, S.F., & Faizi, M. (2005). Effects of using municipal wastewater in irrigation of potato. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 12(1), 61-72. [In Persian]
- Oron, G., Demalach, J., Hofman, Z., & Manor, Y. (1992). Effect of effluent quality and application method on agricultural productivity and environmental control. *Water Science Technology*, 26, 1593-1601. doi:10.2166/wst.1992.0603
- Rahimi, H., Ghobadina, M., & Ahmadi, H. (2004). The use of geosynthetic materials as drainage under the covering of canals. Drainage system under the cover of the channels workshop, Tehran. [In Persian]. <http://www.imcid.org/ArticlesDet.aspx?ID=909&CatId=40>

- Sharma, S.K., & Kennedy, M.D. (2016). Soil aquifer treatment for wastewater treatment and reuse. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1-7. doi:10.1016/j.ibiod.2016.09.013
- Sharma, S.K., Hussien, M., & Amy, G. (2011). Soil aquifer treatment using advanced primary effluent. *Water Science Technology*, 64, 640e646. doi:10.2166/wst.2011.663
- Sdiri, W., AlSalem, H.S., Al-Goul, S.T., Binkadem, S.M., & Mansour, H.B. (2023). Assessing the effects of treated wastewater irrigation on soil physico-chemical properties. *Sustainability*, 15, 5793. doi:10.3390/su15075793
- Tabatabaei, S., Googochani, S., Ghobadinia, M., Motaghian, H. R., & Asgari, A. (2023). The effect of using bi-levels geocomposite sheets on the chemical and biochemical characteristics of soil under wastewater reuse. *Water and Soil Management and Modelling*, Online Publication, doi:10.22098/mmws.2023.13904.1372
- Taheri-Sodejani, H., Ghobadinia, M., Tabatabaei, S.H., & Kazemian, H. (2015). Using natural zeolite for contamination reduction of agricultural soil irrigated with treated urban wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 54(10), 2723-2730. doi:10.1080/19443994.2014.904818
- Torabi Far, M., Jaafarzadeh, N., Takdastan, A., Jafarnejadi, A.R., & Afshar, A.M. (2013). Performance of a land treatment system and vetiver plant for advanced treatment of Ahvaz west Municipal wastewater treatment plant effluent. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*, 20(4), 511-520. [In Persian]